Moizo Marrubio, P. (2004): "La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en Ecología de Paisaje", GeoFocus (Artículos), nº 4, p. 1-24. ISSN: 1578-5157

LA PERCEPCIÓN REMOTA Y LA TECNOLOGÍA SIG: UNA APLICACIÓN EN ECOLOGÍA DE PAISAJE

PAUL MOIZO MARRUBIO
Laboratorio de Micología
Facultad de Ciencias - Universidad de la República - Uruguay
pmoizo@adinet.com.uy

RESUMEN

Las imágenes de percepción remota procesadas con la tecnología de los sistemas de información geográfica (SIG) constituyen una importante herramienta de trabajo en la investigación en Ecología de paisajes. Se utilizan aquí para desarrollar una aproximación al estudio y diagnóstico ecológico de un área afectada por la intervención antrópica. En el SIG se editan diferentes planos temáticos de información a partir de los cuales se cuantifica la estructura espacial que surge de interpretar el uso del suelo según el grado de artificialización del medio. Como resultado se elabora una propuesta de regionalización en subáreas, de acuerdo al patrón espacial, y se propone una interpretación de los atributos ecológicos del área en cuestión.

Palabras clave: Percepción remota, sistemas de información geográfica, patrón espacial, índices de paisaje, cuantificación, regionalización ecológica.

ABSTRACT

Remote sensing presents a unique perspective for observation and measurement of biophysical characteristics. Remotely sensed data can be collected at multiple scales and at multiple times. These attributes make remote sensing appealing for application to landscape ecology. One of the main technologies for landscape research is the geographic information system (GIS). Both remote sensing and GIS are used here as tools to analyze the landscape structure through pattern quantification and to propose an ecological regionalization of land use in a suburban area.

Keywords: Remote sensing, geographic information system, spatial pattern, landscape metrics, quantification, ecological regionalization.

Recibido: 24/10/2003
Aceptada versión definitiva: 19/12/2003

1. Introducción

Uno de los principales objetivos de la Ecología del Paisaje, es el estudio de los efectos recíprocos entre el patrón espacial y los procesos ecológicos que se manifiestan a escala de paisaje. (Forman y Gordón, 1986; Forman, 1995; Pickett y Cadenasso, 1995 y Matteucci, 1998[a]).

Los cambios en el paisaje pueden ser causados por procesos naturales o por la intervención humana. Los producidos por la intervención humana pueden ser planificados o no, y la urbanización, la deforestación, el desarrollo de la agricultura, la desertificación y la reforestación son considerados como sus principales causas (Forman, 1995; Forman y Collinge, 1997).

Forman (1995) destaca diversos procesos de transformación espacial, dentro de los cuales la fragmentación del hábitat es uno de los más importantes. Sus efectos espaciales -variación del tamaño y el número de parches, su forma y dimensión fractal, conectividad y aislamiento entre otros-, inciden sobre numerosos procesos ecológicos. A la fragmentación se le atribuye entre otros la pérdida de especies (Saunders, 1989), efectos sobre el régimen hídrico, la vegetación y la fauna de vertebrados (Saunders *et al.,* 1993), distinguiéndose además diferentes tipos de arreglos espaciales según sea el patrón de fragmentación (Shorrocks *et al.*, 1979; Adiccott *et al.*, 1987).

La estructura, función y cambio son consideradas las tres principales propiedades del paisaje, y su identificación y medida dependen de la escala espacial de observación (Meentemeyer y Box, 1987; Matteucci, 1998[d]). Con el objetivo de simplificar la interpretación de su estructura, se ha desarrollado el modelo de patrón espacial en mosaico que propone una representación del paisaje compuesta por tres elementos -parches, corredores y matriz- (Forman y Gordón, 1986; Turner y Gardner, 1991; Forman, 1995; Ahern 1995; National Development Plan, 2000).

La cuantificación de la estructura es considerada un prerrequisito para el análisis del patrón espacial y de su relación con los procesos que se estudian. La cuantificación reduce la complejidad del paisaje a un conjunto de valores numéricos o índices (Turner y Gardner, 1991; Matteucci, 1998[b]). La estructura del paisaje se cuantifica mediante el conteo de píxeles o de puntos, siendo la primera opción la técnica más usada en Ecología del Paisaje. El conteo se realiza superponiendo a la imagen que se estudia una grilla dividida en cuadrados. Cada cuadrado es un píxel y su dimensión representa el nivel de resolución; esto es, cada píxel está identificado por una y sólo una de las clases o categorías que se estudian, las cuales son asignadas al píxel mediante reglas preestablecidas (Matteucci, 1998[b]).

En este contexto de la Ecología de Paisaje, la percepción remota se ha constituido en una herramienta importante para el análisis, facilitando y ampliando la representación, la interpretación y el análisis de los datos espaciales (Coulson *et al.* 1991; Texeira *et al.* 1992). Su uso combinado con la tecnología SIG, ha permitido incrementar las posibilidades de tratar paisajes y regiones en forma integral, aportando en estas investigaciones una mejor planificación y manejo en su diagnóstico y transformación (Jonson, 1969; Quattrochi y Pelletier, 1991).

Las imágenes de percepción remota procesadas en un SIG, permiten integrar y analizar la heterogeneidad espacial en formato digital, fácilmente mensurable. Una imagen digital está constituida por píxeles, que se obtienen al convertir el intervalo continuo de valores análogos de

radiación registrada por un sensor en un intervalo expresado por un número finito de enteros -números digitales- (Lillesand y Kiefer, 1994). Con la tecnología SIG es posible por un lado, modificar el tamaño del píxel y variar así el nivel de resolución de la imagen -tamaño de grano-, permitiendo un análisis de la heterogeneidad espacial a diferentes escalas; por otro lado es posible calcular los índices de paisaje, ya sea en forma directa a través de un módulo específico, o en forma indirecta, a través de formatos de importación y exportación de datos, permitiendo el intercambio de informaciones con otros programas (Cámara *et al,*. 1996; FRAGSTATS, McGarigal y Marks, 1995).

El propósito de este trabajo es analizar un área afectada por la intervención humana a escala de paisaje y desde el punto de vista ecológico, utilizando fotografías aéreas procesadas en un SIG Como hipótesis se plantea la posibilidad de regionalizar ecológicamente dicha área interpretando el uso del suelo según un gradiente de artificialización (Long, 1974; Forman y Gordón, 1986; Dunn *et al,* 1991). La regionalización se realiza desarrollando dos aproximaciones (Matteucci, 1998[c]): a) en primer lugar se aplica un criterio de regionalización genética del área de estudio clasificando escenas parciales del área según un gradiente de artificialización, y b) en segundo lugar se procede a una regionalización paramétrica con información cuantitativa obtenida de índices de paisaje calculados a partir del patrón espacial de las mismas escenas. Ambos resultados se analizan y se comparan; se interpreta la información del patrón espacial proporcionada por los índices, y luego se describen los atributos ecológicos del área.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio y base de datos

El área de estudio comprende el litoral del Departamento de Canelones, Uruguay, y se sitúa entre las coordenadas 61° 60' y 62° 30' longitud Oeste y entre los -38° 40' y -38° 75' latitud Sur, con una superficie (extensión) de 1216 km^2 (figura 1).

A partir de la imagen satelital de dicha área se editó en el SIG a escala cartográfica 1:50000, un mapa base en el que se digitalizaron los siguientes planos de información temáticos categorizados según los rangos de densidad de habitantes y coberturas de uso del suelo descritos en la tabla 1a y representados en la figuras 2a, 2b y 2c: a) plano temático de uso urbano, b) plano temático de uso agrícola, c) plano temático de uso silvestre natural. La información alfa-numérica y cartográfica para editar el plano temático de uso urbano fue obtenida del Censo del Instituto Nacional de Estadística (INE 1994). La información de los planos agrícola y silvestre natural lo fue del Censo Agropecuario (MGAP 1990).

En un cuarto plano de información se digitalizó la distribución de 63 fotografías aéreas del área -escenas parciales- tomadas a escala cartográfica 1:20000 y que datan entre los años 1986 y 1989 (figura 2d). En cada una de ellas se digitalizó la interpretación de 7 categorías de uso del suelo categorizadas en un rango en correspondencia con un gradiente de artificialización del medio. Se editaron 63 planos de información temáticos en formato "vectorial", y se generaron a partir de ellos otras tantas imágenes en formato "raster" con una resolución de 200 m por 200 m (tabla 1b y figura 3) (Camara *et al*, 1996; Buzai, 1998).

Moizo Marrubio, P. (2004): "La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en Ecología de Paisaje", GeoFocus (Artículos), nº 4, p. 1-24

Los planos de información a escala 1:50000, así como el conjunto de los que se editaron para cada escena parcial a escala 1:20000, se utilizaron para elaborar diferentes clasificaciones a priori de las escenas parciales según cada uno de los criterios de gradiente de artificialización del medio que se detallan en la tabla 2; dos de ellos -GRADART1 y GRADART2- generan las clasificaciones de escenas expuestas en la figura 4; las clasificaciones a priori fueron consideradas como clasificaciones observadas de las escenas parciales.

En las imágenes raster se cuantificó el patrón espacial de cada escena a través del cálculo de los siguientes índices de paisaje (Matteucci, 1998[b]; Turner, 1989): *Fractal (D), Forma 1* (F_1)*, Forma 2* (F_2)*, Diversidad (H'), Dominancia (D'), Homogeneidad* (H_0)*, Entropía (E), Contagio1* (C_1)*, Contagio 2 (C2), y Contagio 3* (C_3) (Apéndice 1).

Los índices *D*, F_1, F_2, *H', y D'* se basan en el cálculo de probabilidades estimadas a partir de la cantidad de píxeles así como en la relación perímetro / área de los parches de las categorías.

Los índices H_0, *E*, C_1, C_2, *y* C_3 en su conjunto conforman índices de textura del paisaje, y se basan en el conteo de los contactos entre píxeles de la misma y diferentes categorías; para el conteo no se contempla el orden de los contactos, y la regla por la cual un píxel se considera en contacto con otro (regla del operador posicional), es contar como contacto a la derecha y debajo de cada pixel (Matteucci, 1998[b]). *Fractal* se calcula en dos versiones, vectorial y raster (Apéndice 1).

2.2. Análisis estadístico

Para analizar el comportamiento de los índices en cuanto a su potencial de discriminación aplicados a cada uno de los criterios de agrupamiento a priori de las escenas se utilizó en forma exploratoria el método multivariado de análisis discriminante. Los índices se sometieron a la verificación de las siguientes condiciones: a) distribución normal con el test de normalidad de Kolmogorov – Smirnov, b) homogeneidad de la varianza con el test de Bartlett, y c) homogeneidad de la matriz de varianzas y covarianzas con el test multivariado no paramétrico de Sen y Puri's. Para ser incluidos en el análisis los índices fueron seleccionados mediante el método de inclusión-exclusión iterativa y el criterio utilizado para comparar la bondad de ajuste o poder discriminante fue el valor del "Lambda de Wilks" (Legendre *et al.*, 1984; Jonson, 1998) (StatSoft Inc., 1999).

El análisis permitió determinar *a)* con cuál de los criterios de clasificación se obtiene la mejor discriminación con información cuantitativa del patrón espacial, *b)* cuántos y cuáles de los índices utilizados discriminaron y agruparon significativamente las escenas parciales -clasificación calculada- según el gradiente de artificialización, y *c)* la correspondencia entre las clasificaciones observadas y calculadas de las escenas, analizando el porcentaje de coincidencias entre unas y otras.

Moizo Marrubio, P. (2004): "La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en Ecología de Paisaje", GeoFocus (Artículos), nº 4, p. 1-24

3. Resultados

3.1.Índices y criterios seleccionados

GRADART1 y GRADART2, fueron los criterios que generaron las clasificaciones calculadas de escenas que más se aproximaron a las observadas. El modelo generó una asociación estadística entre las clasificaciones observadas y calculadas representada en un 80.95% de coincidencias en el total de la clasificación (tabla 3 y figura 5).

Al analizar las 63 escenas parciales a escala cartográfica 1:20000 con una resolución de grano de 200 m por 200 m, se seleccionaron los índices *Diversidad, Dominancia, Sfractal y Homogeneidad* por su poder discriminante entre grados. En un análisis dentro de grados, y agrupando a priori las escenas según el nivel de fragmentación, el índice *Contagio 3* discriminó en forma significativa en cada grado. En el análisis del patrón espacial, también fue considerada la información obtenida sobre el número de parches de las escenas así como su tamaño promedio (tabla 4).

Todos los índices seleccionados contribuyeron significativamente a la discriminación entre grados. No presentaron desviaciones significativas de la distribución normal y se corroboró la homogeneidad en la varianza de cada uno. También se corroboró la homogeneidad de varianzas y covarianzas a nivel multivariante (homoscedasticidad).
Diversidad y Dominancia presentaron el menor valor parcial de Lambda Wilks'.

3.2. Análisis entre grados

Las escenas de ALTO y BAJO grado de artificialización presentaron porcentajes de coincidencias mayores al 90% al comparar las clasificaciones observadas (por gradiente de artificialización) con las calculadas (por cuantificación del patrón espacial). Esto no ocurre con las escenas agrícolas, cuya coincidencia entre ambas clasificaciones fue menor a un 50% (tabla 3). Por esta razón, desde el punto de vista de su patrón espacial las escenas de MEDIO grado de artificialización, pueden ser consideradas como escenas con una estructura de transición entre los extremos del gradiente.

Los menores valores parciales del Lambda de Wilk's que presentaron *Diversidad y Dominancia* permiten suponer que la cantidad de categorías de uso del suelo presentes así como la diferencia en la proporcionalidad de su distribución son los componentes de mayor peso para establecer diferencias entre escenas. Las escenas de BAJO grado difirieron significativamente de las de MEDIO en cuanto a la diversidad de categorías de uso del suelo presentes y a la proporcionalidad de su distribución (dominancia). La misma diferencia puede encontrarse entre las escenas de BAJO y ALTO grado pero no entre las escenas de ALTO y MEDIO (tabla 5).

Las escenas de ALTO grado son más diversas en cuanto a la composición de parches (categorías de uso del suelo), los que presentan un tamaño promedio menor (escenas más fragmentadas), y una distribución uniforme y proporcional que las de BAJO grado. Éstas son menos

Moizo Marrubio, P. (2004): "La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en Ecología de Paisaje", GeoFocus (Artículos), nº 4, p. 1-24

diversas y menos fragmentadas, y tienen un mayor tamaño promedio de parche con una distribución del tamaño que tiende a la dominancia de alguno de ellos.

Si tenemos en cuenta que todas las escenas tienen la misma superficie -16 km^2-, así como que las de ALTO grado presentan los valores más altos del índice *Diversidad* y el número promedio más elevado de parches, los resultados obtenidos a la escala de análisis indican que el proceso de artificialización del medio llevó a la fragmentación del paisaje.

Homogeneidad presentó diferencias significativas entre las escenas de BAJO grado y las de MEDIO y ALTO, pero no entre estas últimas (tabla 5). Con mayor tamaño promedio de parches, las escenas de BAJO grado son más homogéneas. En ellas, las categorías que representan bosques artificiales y naturales así como comunidades herbáceas se encuentran ocupando mayores superficies. Por esta razón las áreas naturales de estas escenas tienen un menor grado de aislamiento entre sí que el que tienen en las escenas de ALTO grado, lo que a su vez indica un mayor nivel de conectividad entre ellas.

Sfractal separó significativamente las escenas de ALTO grado de las de MEDIO y BAJO (tabla 5). Presentó valores menores en las escenas de ALTO grado, indicando bordes de parches menos complejos, con mayor proporción de perímetros lineales y derechos, característicos de la existencia de la actividad humana. Los valores más elevados se encontraron asociados a las escenas de BAJO y MEDIO grado, donde las perturbaciones naturales y las condiciones topográficas generan bordes más complejos, curvilíneos y con mayor interdigitación (Turner & Ruscher 1988) (O'Neill *et al.,* 1988) (Forman, 1995).

3.3. Análisis de las escenas de ALTO grado de artificialización

Otro patrón espacial analizado fue el de las escenas clasificadas con ALTO grado de artificialización. De acuerdo al nivel de fragmentación, estas escenas se distribuyen geograficamente en dos grupos diferenciados espacialmente; uno con mayor diversidad de contactos (mayor fragmentación), al que pertenecen escenas ubicadas geográficamente hacia el interior en dirección Norte – Sur, y otro con menor diversidad (menos fragmentado e intrincado), al que pertenecen escenas ubicadas a lo largo del litoral en dirección Oeste – Este (figura 6).

Agrupadas a priori según el nivel de fragmentación, el índice que discriminó significativamente dentro de estas escenas fue Contagio 3. Sus valores están asociados negativamente a las escenas de ALTO grado de menor fragmentación: cuanto mayor es el valor de *Contagio 3*, hay menos diversidad de contactos, menos fragmentada y más conexa es la escena. Tal y tal cual se calculó, es un índice que da peso a la proporción de categorías (Matteucci, 1998[b]).

Las escenas de ALTO grado de artificialización que se ubican sobre el litoral poseen el mayor tamaño promedio de parches de toda el área analizada (tabla 4). Presentan a su vez menor cantidad de parches (por lo tanto de mayor tamaño promedio) que las ubicadas hacia el interior del área. Las escenas de ALTO grado del litoral que presentan tamaños de parches aún mayores que los de las escenas de BAJO grado de artificialización, se diferencian de éstas en cuanto a los valores de

Dominancia; mientras que en éstas últimas hay predominancia del tamaño de una categoría sobre las demás, en las escenas del litoral hay una distribución más proporcional de su tamaño.

4. La regionalización estructural y ecológica del área

Con el hallazgo de asociación entre el patrón espacial y el gradiente de artificialización, la variabilidad de los índices puede ser analizada examinando su distribución geográfica (O'Neill *et al* 1988). El patrón geográfico de distribución de escenas de acuerdo a los valores de los índices seleccionados se halló en correspondencia con el de distribución de escenas clasificadas de acuerdo al gradiente de artificialización del medio. Por tanto es posible proponer con razonabilidad que la regionalización considerada a partir de este gradiente, es también una regionalización estructural.

Siguiendo el mismo razonamiento, se puede proponer una regionalización estructural de las escenas de ALTO grado de artificialización con Contagio 3, cuyo patrón de distribución geográfico coincide con el obtenido al diferenciar estas escenas de acuerdo a su nivel de fragmentación en los grupos del interior y del litoral. Si bien *Contagio 3* también discrimina escenas dentro de los grados MEDIO y BAJO, no se halló correspondencia entre los patrones respectivos de distribución.

La regionalización según información cuantitativa del patrón espacial del área objeto de estudio se resume en la figura 7, en la que se delimitan sub áreas con características estructurales diferentes, tal cual el comportamiento y sensibilidad de los índices estudiados ha permitido destacar al nivel de resolución analizado.

La correspondencia hallada entre el patrón espacial con el gradiente de artificialización del medio, y a su vez la existente entre aquel y los procesos ecológicos (Forman y Gordón, 1986) (Forman, 1995) (Dramstad *et al.,* 1996), permite proponer la regionalización y caracterización ecológica del área según las propiedades que se describen en la tabla 6.

5. Discusión

La información adquirida por percepción remota puede ser procesada a múltiple escala espacial y temporal y ofrece la oportunidad de analizar fenómenos a escala local y regional a través del tiempo. Percibido en forma remota, el paisaje presenta dimensiones horizontales, verticales y multiespectrales. Su dimensión horizontal comprende un conjunto de atributos espaciales que describen la forma, la composición y la posición relativa de sus elementos, que, entre otros, son objeto de estudio en la Ecología de Paisaje (Quattrochi y Pelletier, 1991).

Junto con la tecnología SIG, la percepción remota puede ser utilizada para integrar, medir y mapear información del estado y la dinámica de diversas variables -entre ellas ecológicas-. En un SIG, los atributos espaciales pueden ser editados en formatos alternativos de representación espacial -vectorial y raster-, los cuales constituyen la base de información para la cuantificación de la estructura del paisaje. A su vez, dichos atributos pueden ser asociados a información alfa numérica proveniente de diferentes campos del conocimiento (Coulson *et al.,* 1991; Buzai, 1998).

La investigación y el análisis del paisaje en forma holística, integrando no solo el aspecto natural, sino también el cultural, ha hecho de la intervención antrópica un objetivo de estudio como proceso de transformación espacial del paisaje (Palang *et al*., 2000). Los datos provenientes de los censos poblacionales y agrícolas pueden ser considerados como una importante fuente de información para medir el grado de dicha intervención en un área determinada (Dunn *et al.,* 1991).

En este trabajo se cuantificó el patrón espacial de unidades independientes de un área específica, que fueron divididas en un número determinado de tipos de coberturas. Los índices de paisaje se combinaron en vectores de información y se seleccionaron de acuerdo a su sensibilidad respecto al proceso analizado, en este caso un proceso de origen antrópico. Esta aproximación es adecuada cuando se analiza la integridad de los ecosistemas (Bogaert, 2003).

Los resultados confirman que con la investigación exploratoria del grado de correlación entre el patrón espacial y el proceso que se estudia es posible seleccionar los índices de paisaje sensibles al fenómeno analizado. El desarrollo de las investigaciones que analicen esta correlación en el marco de la intervención antrópica, constituye una importante fuente de información para el manejo y la predicción de los cambios y sus consecuencias en el paisaje, así como para la creación de bases objetivas de planificación y manejo del territorio.

Referencias bibliográficas

Ahern, J. (1995): "Greenways as a planning strategy", *Landscape and Urban Planning,* 33, pp. 131-15.

Addicott, J. F, Aho J. M., Antolin M. F., Padilla D. K., Richardson J. S. y Soluk J. S. (1987): "Ecological neighborhoods: scaling environmental patterns", *OIKOS,* 49, pp. 340-346.

Bogaert, J. (2003): "Lack of agreement on fragmentation metrics blurs correspondence between fragmentation experiments and predicted effects", *Conservation Ecology,* 7, 1, r6. [online] URL: http://www.consecol.org/vol7/iss1/resp6

Buzai, G. D. (1998): "Sistemas de Información Geográfica (SIG)", en Matteucci, S. D. y Buzai, G. D. (Eds.): *Sistemas ambientales complejos: herramientas de análisis espacial*. Universidad de Buenos Aires, Eudeba. pp. 185-191.

Camara ,G., Souza, R.C.M., Freitas, U. M. y Garrido, J. (1996): "SPRING, Integrating remote sensing and G.I.S. by object oriented data modeling", *Computers and Graphics*, 20, 3, pp. 395-403.

Coulson R. N. Lovelady, C. N., Flamm, R. O., Spradling, S. L y Saunders, M. C. (1991): "Intelligent geographic information systems for natural resource management", en Turner M. G. and Gardner R. H. (Ed.): *Quantitative methods in landscape Ecology*. New York, Springer Verlag. pp. 153-172.

Dramstad W. E., Olson J. D. y Forman R.T.T. (1996): *Landscape Ecology. Principles in landscape architecture an land use planning*. Harvard University, Island Press.

Dunn, C. P., Sharpe, D. M., Guntenspergen, G. R., Stearns, F. y Yang, Z. (1991): "Methods for analyzing temporal changes in landscape pattern", en Turner M. G. and Gardner R. H. (Eds.): *Quantitative Methods in Landscape Ecology*. New York, Springer Verlag. pp. 51-76.

Forman R.T.T. y Gordón, M. (1986): *Landscape Ecology*. New York, John Wiley and Sons.

Forman, R.T.T. (1995): *Land mosaics. The ecology of landscapes and regions*. Cambridge, University Press.

Forman, R.T.T. y Collinge S. K. (1997): "Nature conserved in changing landscapes with and without spatial planning", *Landscape and Urban Planning,* 37, pp. 129-135.

I.N.E. (1994): *VI Censo General de Población, III de Hogares y V de Viviendas*. Uruguay, Instituto Nacional de Estadística.

Johnson, D. E. (1998): *Métodos multivariados aplicados al análisis de datos*. México, International Thompson Editores S.A de C.V.

Johnson, P. (1969): *Remote sensing in Ecology*. University of Georgia Press, Athens.

Legendre, L. y Legendre P. (1984): *Ecologie numérique: 2. La estructure des donnés écologiques.* Paris, Masson et Cie. Editeurs et les Presses de l'Université du Quebec. 2[e] édition.

Lillesand T. M. y Kiefer R. W. (1994): *Remote sensing and image interpretation.* New York, John Wiley and Sons, 3[a] ed.

Long, G. (1974): *Diagnostic phyto – ecologique et amenagement du territoire. Principes generaux et methodes; Collection D´Ecologie 4.* Paris, Masson et Cie. Editeurs.

Matteucci, S. D. (1998[a]): "La creciente importancia de los estudios del medio ambiente" en Matteucci, S. D. y Buzai, G. D. (Eds.): *Sistemas ambientales complejos: herramientas de análisis espacial.* Universidad de Buenos Aires, Eudeba, pp. 19-30.

Matteucci, S. D. (1998[b]): "La cuantificación de la estructura del paisaje", en Matteucci S. D. y Buzai G. D. (Eds.): *Sistemas ambientales complejos: Herramientas de análisis espacial*. Universidad de Buenos Aires, Eudeba, pp. 271-291.

Matteucci S. D. (1998[c]): "El análisis regional desde la ecología", en Matteucci, S. D. y Buzai, G. D. (Eds.): *Sistemas ambientales complejos: Herramientas de análisis espacial.*. Universidad de Buenos Aires, Eudeba, pp. 117-150.

Matteucci, S. D. (1998[d]): "La cuestión del patrón y la escala", en Matteucci S. D. y Buzai G. D. (Eds.) 1998. *Sistemas ambientales complejos: Herramientas de análisis espacial*. Universidad de Buenos Aires, Eudeba, pp. 219-248.

McGarigal, K., y B. J. Marks. (1995): *FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*. General Technical Report PNW-GTR-351, United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon, USA.

Meentemeyer V. y Box E. O. (1987): "Scale effects in landscape studies", en Monica G. T. (Ed.): *Landscape Heterogeneity and Disturbance*. New York, Springer – Verlag, pp. 15-34.

M.G.A.P. (1990): *Censo Agropecuario*. Uruguay, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección de Censos y Encuestas.

National Development Plan (2000): *EcoNet Ireland -Background to the Ecological Netwotk Concept. A preliminary study of the needs associated with a national ecological network for Ireland*. Commissioned by the Environmental Protection Agency, Ireland, from Compass Informatics Ltd. Department of Environment and Local Government, Ireland. On line: http://econetireland.net/

O'Neill R.V., Krummel J. R., Gardner R. H., Sugihara G., Jackson B., De Angelis D. L., Milne B. T., Turner M.G., Zygmunt B., Christenesen S. W., Dale V. H. y Graham R. L. (1988): *Indices of landscape pattern*. Landscape Ecology 1, 3, pp. 153-162.

Palang, H., Mander, U. y Naveh, Z. (2000): "Holistic landscape ecology in action", *Landscape and Urban Planning*, 50, pp. 1-6.

Pickett, S.T.A. y Cadenasso, M.L. (1995): "Landscape Ecology: spatial heterogeneity in ecological systems"*, Science*, 269, pp. 331-334.

Quattrochi, D. A. y Pelletier, R. E. (1991): "Remote sensing for analysis of landscapes: an introduccion", en Turner M.G. and Gardner R.H. (Ed): *Quantitative methods in landscape Ecology*. New York, Springer – Verlag, pp. 51-76.

Saunders, D. A. (1989): "Changes in the avifauna of a region, district and remnant as a result of fragmentation of native vegetation: the Wheatbelt of Western Australia. A case study". *Biological Conservation*, 50, pp. 99-135.

Saunders, D.A., Hobbs, R.J., y Arnold, G.W. (1993): "The Kellerberrin project on fragmented landscapes: a review of current information", *Biological Conservation*, 64, pp. 185-192.

Shorrocks, B., Atkinson W. D. y Charlesworth P. (1979): "Competition on a divided and ephemeral resource", *Journal of Animal Ecology*., 48, pp. 899-908.

StatSoft Inc. (1999): *STATISTICA for Windows (Computer program manual):* Tulsa, OK: StatSoft, Inc., 2300 East 14th street, Tulsa, OK 74104, phone: (918) 749-1119, fax (918) 749-2217, email: info@statsoft.com, Web: http://www.statsoft.com

Texeira A.L.A., Moretti M. y Christofoletti A. (1992): *Introduçao aos sistemas de infromacao geografica.* Río Claro, UNESP.

Turner, M. G. (1989): "The effect of pattern on process", *Annual Review of Ecology and Systematics*., 20, pp. 171-197.

Turner, M. G. y Ruscher, C. L. (1988): "Changes in landscape patterns in Georgia, USA". *Landscape Ecology*, 1, 4, pp. 241-251.

Turner, M. G. y Gardner, R. H. (1991): "*An Introduction*", en Turner M. G. y Gardner R. H. (Eds.): *Quantitative Methods in Landscape Ecology*. New York, Springer - Verlag, pp. 3-14.

TABLAS

Tabla 1. Planos temáticos de información

a)

Plano temático de uso urbano (escala 1-50000).	Categorización de zonas del censo poblacional en tres grupos según la densidad de habitantes por km2: -Más de 50 habitantes por km2 -Entre 10 a 50 habitantes por km2 -Menos de 10 habitantes por km2
Plano temático de uso agrícola (escala 1-50000).	Categorización de seccionales del censo agropecuario según el porcentaje de cobertura de tierras de labranza, cultivos y bosque artificiales: -Más de 57% -Entre 36 y 57% -Menos de 36%
Plano temático de uso silvestre natural (escala 1-50000).	Categorización de seccionales del censo agropecuario según el porcentaje de cobertura de tierras de pastos permanentes, bosques naturales y tierras improductivas: -Más de 64% -Entre 43 y 64% -Menos de 43%

b)

Plano de información con la ubicación de 63 fotografías (escala 1:20000). Categorías de uso del suelo interpretadas en cada una de ellas:	1. Urbano denso (ALTO grado de artificialización) 2. Urbano forestado (ALTO grado de artificialización) 3. Agrícola denso (MEDIO grado de artificialización) 4. Agrícola silvestre (MEDIO grado de artificialización) 5. Bosques artificiales (BAJO grado de artificialización) 6. Bosques naturales (BAJO grado de artificialización) 7. Comunidades herbáceas (BAJO grado de artificialización)

a) Los rangos de los planos de información a escala 1:50000 fueron generados a partir de agrupar la información de zonas y seccionales por el criterio de máxima verosimilitud (StatSoft Inc. 1984–1995)
b) 7 categorías de uso del suelo interpretadas en correspondencia con un gradiente de artificialización del medio en cada una de las 63 escenas parciales.

Moizo Marrubio, P. (2004): "La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en Ecología de Paisaje", GeoFocus (Artículos), nº 4, p. 1-24

Tabla 2. criterios de clasificación a priori de las escenas parciales

GRADART1:	Grado de artificialización según área de cobertura en cada escena, variable cualitativa ordinal (escala cartográfica 1:20000)
GRADART2:	Grado de artificialización según área de cobertura urbana igual o menor que una hectárea, variable cualitativa ordinal (escala cartográfica 1:20000)
GRADURBA:	Grado de artificialización según datos poblacionales del Instituto Nacional de Estadística (INE 1994), variable cualitativa ordinal (escala cartográfica 1:50000)
GRADRURA:	Grado de artificialización según datos de cobertura agrícola del suelo obtenidos del Censo Agropecuario (MGAP–DCE, 1990), variable cualitativa ordinal (escala cartográfica 1:50000)
GRADNATU:	Grado de artificialización según datos de cobertura silvestre natural obtenidos del Censo Agropecuario (MGAP–DCE, 1990), variable cualitativa ordinal (escala cartográfica 1:50000)
GRAPREUR:	Grado de artificialización según presencia o ausencia de uso urbano, variable cualitativa ordinal (escala cartográfica 1:20000)

Tabla 3. Porcentajes de coincidencias en la clasificaciones observadas y calculadas de las escenas parciales para los criterios GRADART1 y GRADART2

	GRADART1	**GRADART2**
Grado de artificialización	**Porcentaje correcto**	**Porcentaje correcto**
BAJO (escenas silvestres)	92.31	94.28
MEDIO (escenas agrícolas)	42.85	33.33
ALTO (escenas urbanas)	90.00	87.50
PORCENTAJE TOTAL	80.95	80.95

Tabla 4. Cantidad y tamaño promedio de parches para las escenas de cada grado de artificialización

Escenas	**Cantidad promedio de parches**	**Tamaño promedio de parche (km^2)**
BAJO grado de artificialización	26.66	0.60
MEDIO grado de artificialización	34.50	0.46
ALTO grado de artificialización (interior)	50.50	0.32
ALTO grado de artificialización (litoral)	16.83	0.95

Las de ALTO grado son representadas por los grupos del interior y del litoral

Tabla 5. Análisis entre grados. Significancia obtenida con el test de comparación de medias de Scheffé (StatSoft Inc. 1984–1995), para *Diversidad*, *Dominancia*, *Homogeneidad* y *Sfractal.*

DIVER./DOMIN.	**BAJO**	**MEDIO**	**ALTO**
BAJO	--		
MEDIO	Sig.	--	
ALTO	Sig.	No sig.	--

HOMOGENEIDAD	**BAJO**	**MEDIO**	**ALTO**
BAJO	--		
MEDIO	Sig.	--	
ALTO	Sig.	No sig.	--

SFRACTAL	**BAJO**	**MEDIO**	**ALTO**
BAJO	--		
MEDIO	No sig.	--	
ALTO	Sig.	Sig.	--

Tabla 6. Propiedades ecológicas de las sub áreas generadas a partir de la regionalización estructural del área objeto de estudio.

Proceso Ecológico	**Subárea 1: ALTO Grado de Artificialización muy fragmentado**	**Subárea 2: ALTO grado de Artificialización poco fragmentado**	**Subárea 3: MEDIO grado de Artificialización**	**Subárea 4: BAJO grado de artificialización**
Movimiento de los organismos	Dificultado por la alta frecuencia de ocurrencia de ecotonos y límites entre elementos de paisaje, y por la alta diversidad de ecosistemas adyacentes con diferente tipo de habitabilidad . Debido a la simplicidad de los bordes de los ecosistemas, el movimiento de las especies se realizaría preferentemente a lo largo de los ecotonos	Con mejores condiciones para el movimiento de las especies debido a una menor diversidad de ecosistemas, así como al mayor tamaño que éstos presentan y a la disminución de la cantidad de frecuencia de cruce de ecotonos. El área posee los bordes y las formas más simples de la región; este tipo de borde simple llevaría a que las especies se muevan preferentemente a lo largo del límite y no a través de él	Area en la que según los valores promedios de los índices seleccionados, las características de los atributos ecológicos podrían considerarse intermedias entre aquellas analizadas para los grados ALTO y BAJO de artificialización	Favorable al movimiento de organismos; presenta menor frecuencia de cruce de ecotonos, y mayor tamaño promedio de ecosistemas.- A diferencia del área costera de ALTO grado de artificialización, el tamaño de ecosistemas no se distribuye proporcionalmente. Con Bordes curvilíneos e interdigitados que llevan a una mayor tendencia de las especies a moverse a través de ecotonos y límites.
Interacción entre ecosistemas adyacentes	Formas y bordes poco complejos dificultan la interacción y el flujo de los organismos con los ecosistemas adyacentes	Formas y bordes simples dificultan la interacción y el flujo de los organismos con los ecosistemas adyacentes		Las formas más complejas de los bordes de los ecosistemas lleva a una mayor interacción y flujo de los organismos con los ecosistemas adyacentes
Estructura poblacional	Condiciones espaciales para el establecimiento de metapoblaciones con subpoblaciones pequeñas y de similar tamaño, y con un muy importante grado de aislamiento entre sí	Metapoblaciones con subpoblaciones de mayor tamaño, similares en cuanto a su tamaño, y menos aisladas entre sí que las existentes en las áreas de ALTO grado de artificialización muy fragmentado		Metapoblaciones con subpoblaciones de tamaños diferentes pero siempre de tamaño mayor que en áreas de mayor gradiente de artificialización y con menores niveles de aislamiento entre sí

Genética poblacional	El grado de aislamiento de las subpoblaciones de pequeño tamaño hace de la dispersión de los individuos el principal recurso de variación genética	La tasa mutacional y la deriva genética contribuyen con similar peso a la variación genética		Las subpoblaciones se encuentran menos aisladas entre sí, debido al mayor tamaño poblacional. Los individuos de una misma subpoblación podrían tender a reproducirse entre ellos antes de hacerlo con los de otra subpoblación, haciendo de la mutación un importante recurso de variación genética
	Bajos niveles de endocruza	Con subpoblaciones de mayor tamaño aumentan los niveles de endocruza		Mayores niveles de endocruza
	A igual tamaño poblacional que en otros gradientes mayor variabilidad genética	A igual tamaño poblacional que en otros gradientes menor variabilidad genética		A igual tamaño poblacional que en otros gradientes menor variabilidad genética
	Poblaciones con mejores capacidades de adaptación a las perturbaciones ambientales			Poblaciones con menores capacidades de adaptación a las perturbaciones ambientales
Extinción y recolonización	Alta tasa de extinción local, y bajos niveles de recolonización, reduciendo la estabilidad de las poblaciones	Bajas tasas de extinciones locales debido a que las subpoblaciones son de mayor tamaño y están menos aisladas; la más alta homogeneidad del área facilitaría la recolonización		Subpoblaciones de mayor tamaño y la alta conexión entre sí facilitaría la emigración de individuos para disminuir la tasa de extinciones locales o para eventuales recolonizaciones
Especies de borde y de interior	Mayor probabilidad de existencia de especies de borde, que son generalistas, y adaptadas a condiciones multihábitats	Condiciones favorables para el establecimiento de especies de interior		Condiciones estructurales favorables principalmente para el establecimiento de especies de interior (especialistas)
Resistencia del paisaje	Alta resistencia al movimiento y al flujo de organismos	Baja resistencia al movimiento y al flujo de organismos		Baja resistencia al movimiento y flujo de organismos
Ámbito doméstico de las especies	Condiciones para especies con pequeña área de ámbito doméstico	Condiciones para que habiten especies de amplio ámbito doméstico		Condiciones para que habiten especies de amplio ámbito doméstico

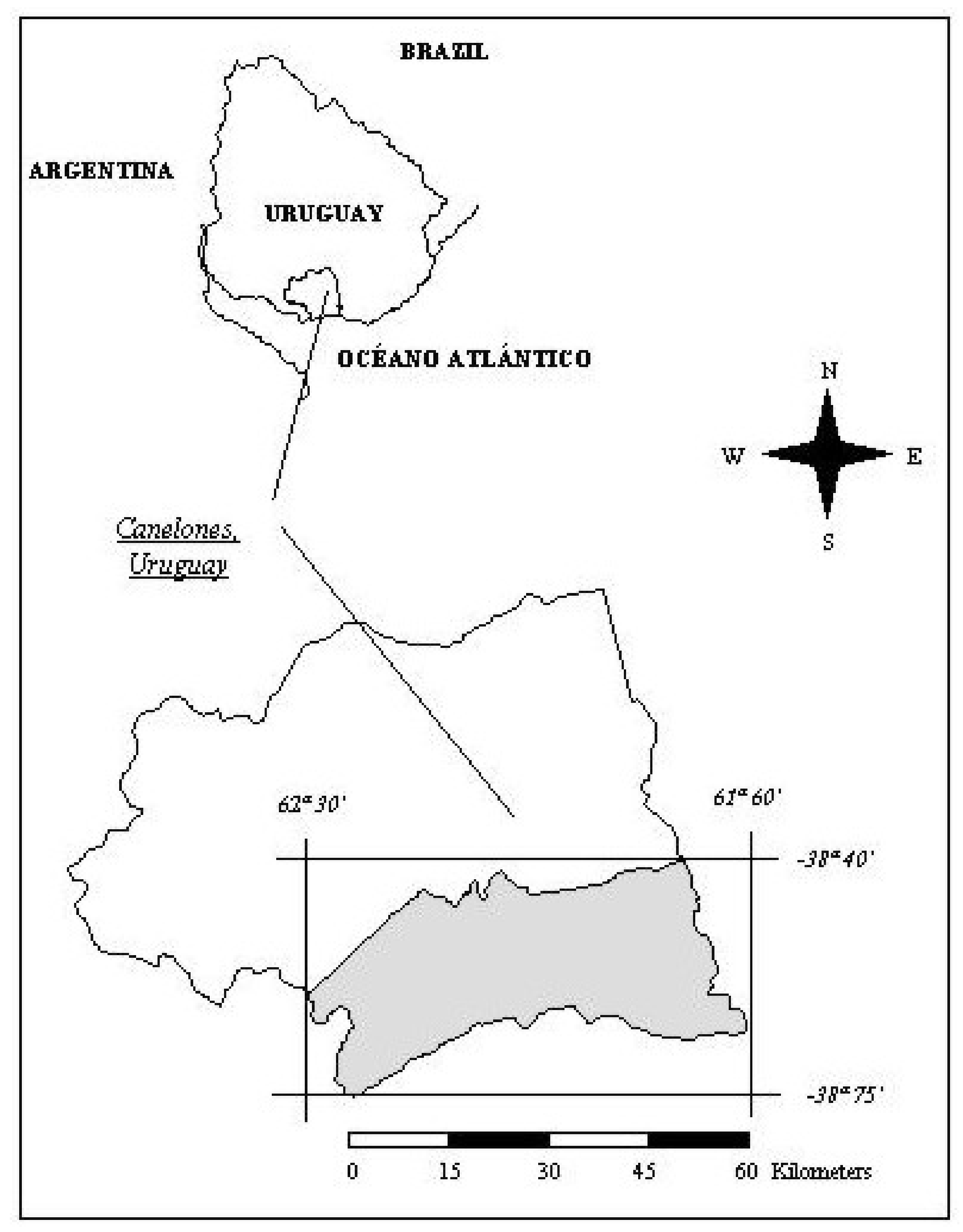


Figura 1. Area de estudio, situada sobre el litoral del Departamento de Canelones, Uruguay.

Moizo Marrubio, P. (2004): "La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en Ecología de Paisaje", GeoFocus (Artículos), nº 4, p. 1-24

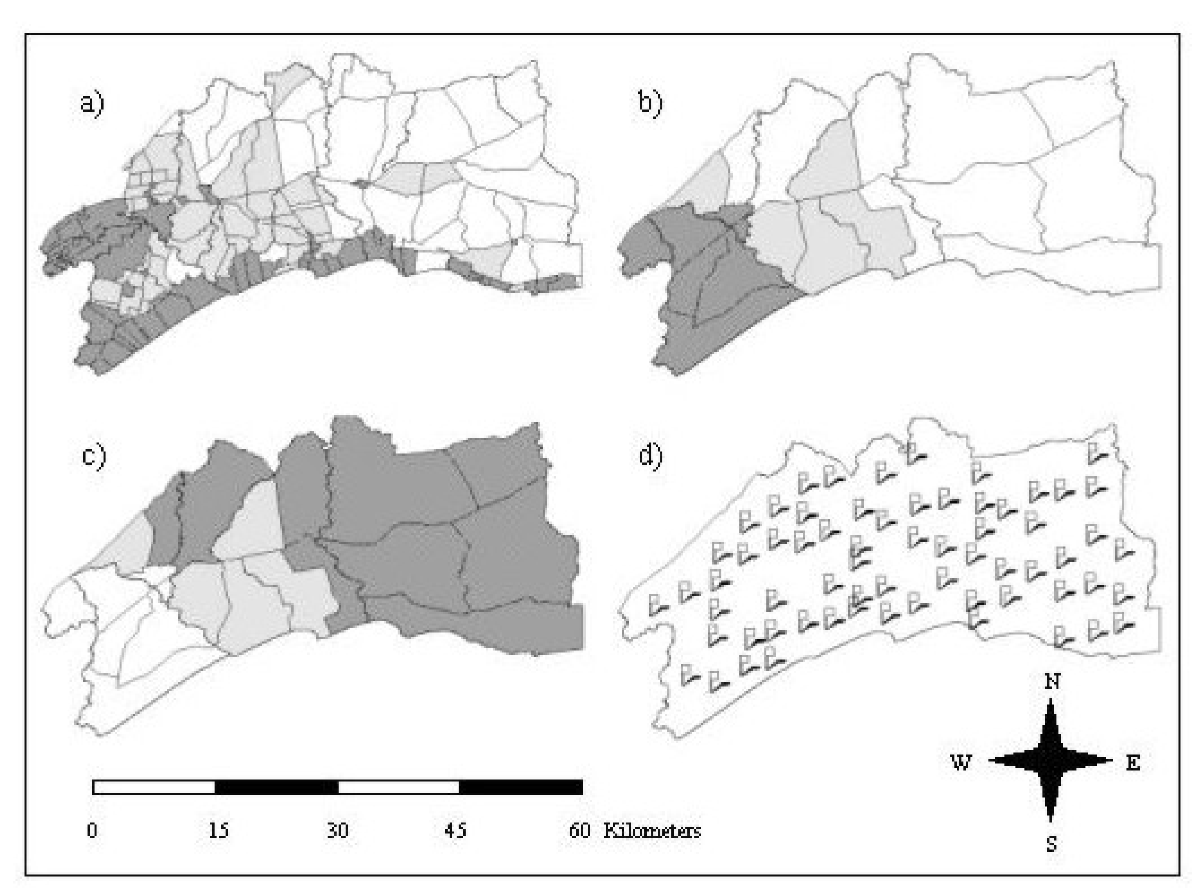


Figura 2. Planos de información temáticos editados en el SIG y categorizados según los rangos descritos en la tabla 1. a) Plano temático de uso urbano, b) Plano temático de uso agrícola, c) Plano temático de uso silvestre natural, d) Plano de información con la distribución y ubicación de 63 fotografías aéreas del área -escenas parciales.
El aumento en el porcentaje de cobertura en cada plano temático se representa con el aumento en el tono de gris

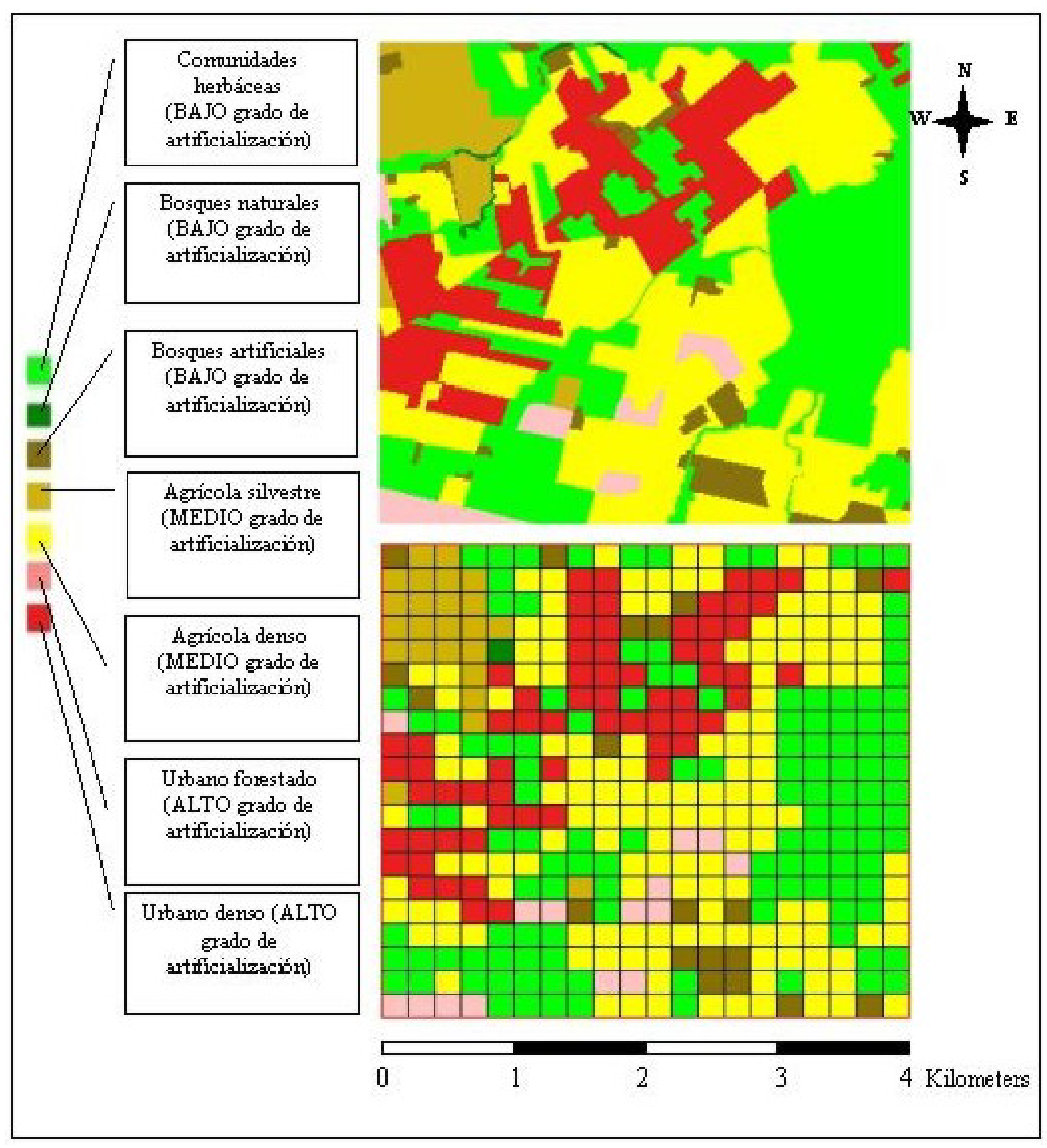


Figura 3.- a) Imagen en formato vectorial de la escena 50 – 0826, en la que se pueden apreciar las siete categorías de uso de la tierra.- La imagen vectorial está basada en puntos, líneas y polígonos (estos últimos delimitan áreas cerradas).- b) La imagen en formato raster es generada a partir de la imagen en formato vectorial con una resolución de píxel de 200 m por 200 m.

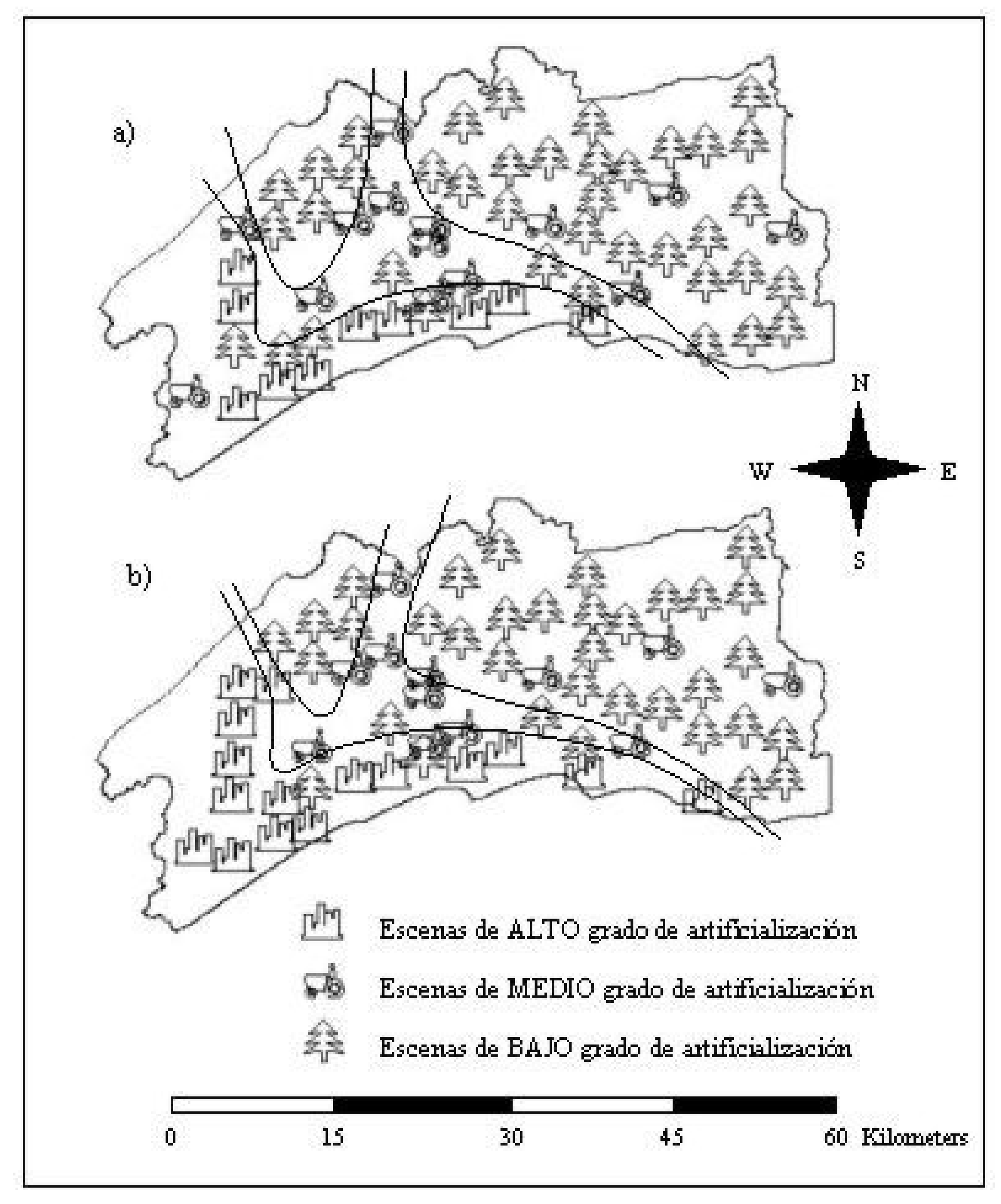


Figura 4. Distribución y clasificación observada en el área de estudio de las 63 escenas parciales, con los criterios de agrupamiento a) GRADART1 y b) GRADART2.
En la figura las líneas representan una regionalización del área en función del gradiente de artificialización.

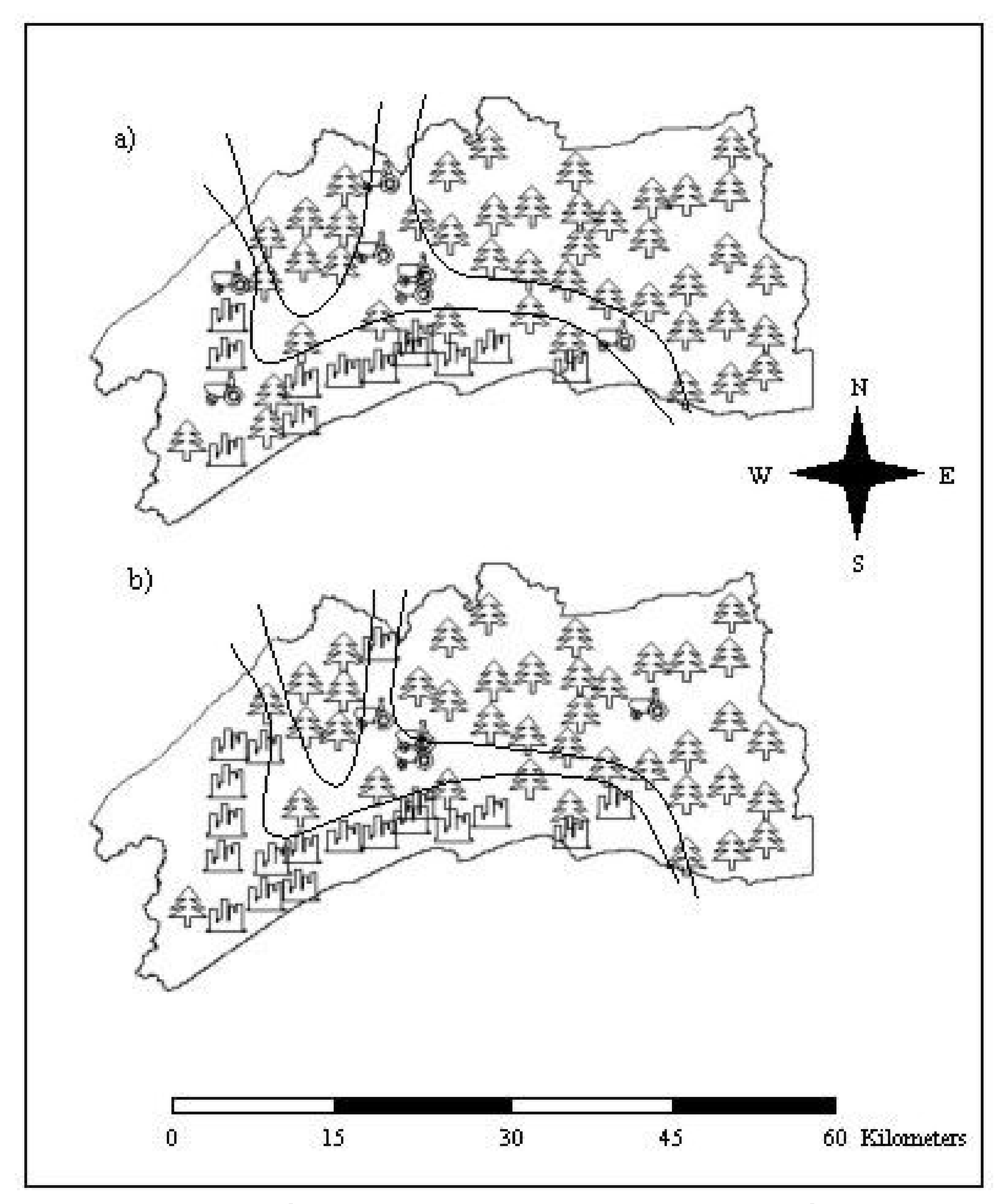


Figura 5. (a) Clasificación calculada con GRADART1. (b) Clasificación calculada con GRADART2. Similar leyenda que en la figura 4.

La coincidencia entre la clasificación observada y la calculada es de un 80.95% para ambos criterios. La mayoría de las discordancias entre las clasificaciones calculadas y las observadas son con las escenas de grado MEDIO de artificialización. En la figura las líneas representan una regionalización del área de acuerdo a su patrón espacial.

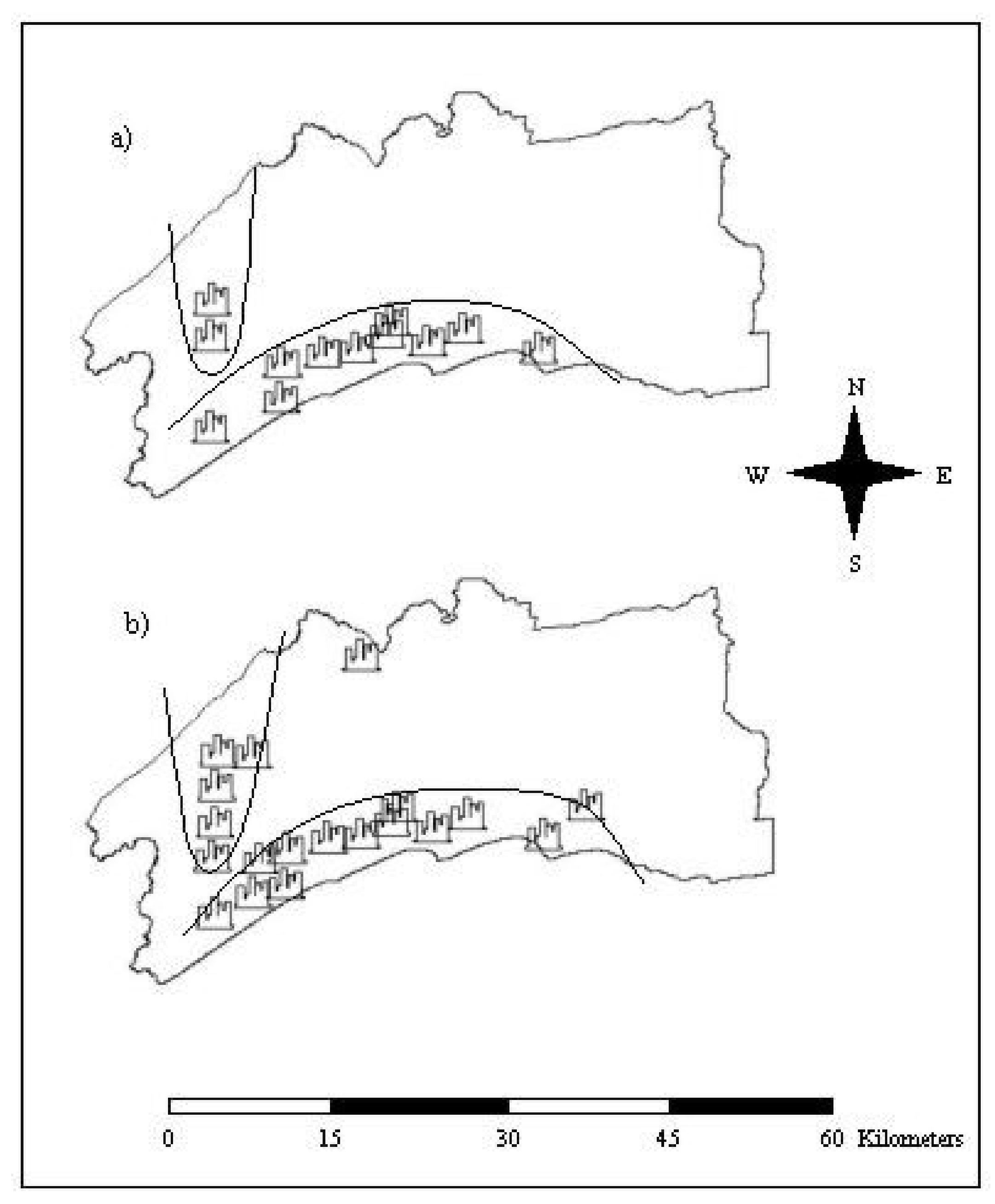
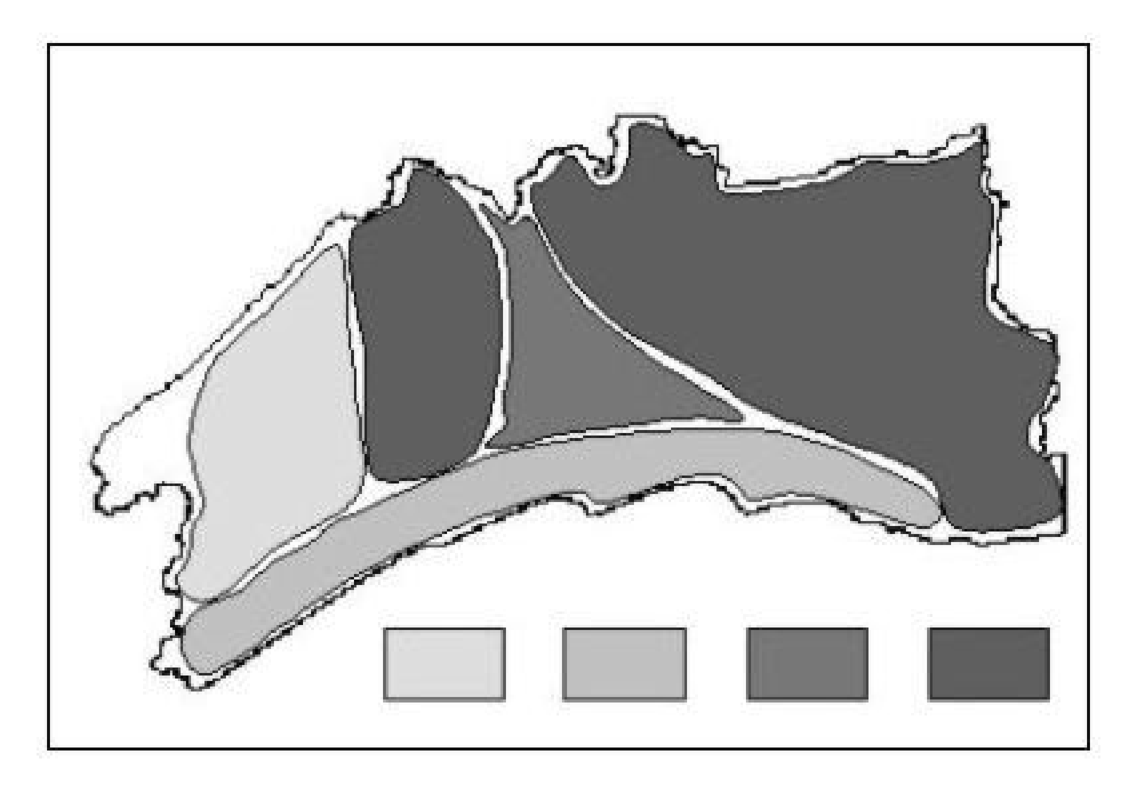


Figura 6. Patrón de distribución geográfico de las escenas de ALTO grado de artificialización.
Similar leyenda que en la figura 4. Tanto para GRADART1 (a) como para GRADART2 (b), el índice CONTAGIO 3 tiene un elevado poder de discriminación dentro de las escenas de ALTO grado de artificialización. Las líneas representan una regionalización del área según su patrón espacial, que se ajusta al patrón de distribución geográfico que divide las escenas en dos grupos de acuerdo al nivel de fragmentación: uno en dirección del interior del área, y otro a lo largo del litoral.



Grado de artificialización:	Alto (sub área 1)	Alto (sub área 2)	Medio (sub área 3)	Bajo (sub área 4)
Diversidad	Alta	Baja	Media	Baja
Homogeneidad	Baja	Alta	Media	Alta
Dominancia	Baja	Baja	Media	Alta
Forma de bordes y parches	Más Simple	Más Isodiam	No dif.	Más compleja
Fragmentación	Alta	Baja	Media	Baja
Tamaño de Parche	Pequeño	Grande	Medio	Grande

Figura 7. Regionalización estructural del área objeto de estudio.
Se delimitan 4 subáreas con diferencias estructurales de los elementos de paisaje que las componen. Las subáreas difieren también en cuanto a la manifestación de los procesos ecológicos que en ellas subyacen.

Moizo Marrubio, P. (2004): "La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en Ecología de Paisaje", GeoFocus (Artículos), nº 4, p. 1-24

APÉNDICE 1
Índices utilizados en la cuantificación del patrón espacial

a) *Fractal (D):* se emplea como un índice de complejidad de los bordes de los fragmentos, y se obtiene a partir de la relación

$$L_i = k\,(S_i)^{D/2}$$

en la que:
-k es una constante
-S_i es el área de cada fragmento de la categoría i
-L_i es el perímetro de cada fragmento de la categoría i
Para este índice se calcularon dos valores diferentes:
-uno a partir de la imagen raster tal cual se hizo con los demás índices *(IFractal)*
-otro a partir de la información de superficies y perímetros de la imagen vectorial proporcionada directamente por el SIG*(SFractal)*

b)Forma 1 (F_1): indica la presencia o no de muchos parches de área pequeña; valores elevados de F1 indican la presencia de muchos parches de área pequeña, y su fórmula es

$$(F_1)_i = (1/k_i)\,\Sigma\,(L_i/S_i)$$

c)Forma 2 (F_2): indica la presencia o no de parches isodiamétricos; cuanto más se desvía su valor de 1, menos isodiamétricos son los parches, y se obtiene a partir de la relación

$$(F_2)_i = (1/k_i)\,\Sigma\{L_i/4\,(S_i)^{1/2}\}$$

d)Diversidad (H'): da una medida de la riqueza de categorías y de la equidad en la distribución de los pixeles en las distintas categorías del área de estudio:

$$H' = -\,\Sigma\,\{p_i \ln p_i\}$$

Siendo p_i la probabilidad de que un pixel pertenezca a la categoría i

*e)Dominancia (D'):*da una medida de la distribución de la superficie estudiada en las categorías que la conforman, pero sin dar información acerca de cual de las categorías domina:

$$D' = \ln m + \Sigma\,\{p_i \ln p_i\}$$

Donde m es la cantidad de categorías

*f)Homogeneidad (H_0):*da una medida de la homogeneidad del área de estudio, en el sentido de la ocurrencia de pixeles adyacentes similares; (varía entre 0 y 1, y cuanto mayor es H_0, más homogénea es el área de estudio):

$$H_0 = \Sigma\,(q_{ii})^2$$

Donde q_{ij} es la probabilidad de que un pixel de la categoría i esté en contacto con uno de la categoría j

*g)Entropía (E):*da una medida de cuan intrincado es el paisaje; es máxima cuando todas las q_{ij} son iguales para todos los tipos de contactos, y se define como

$$E = - \sum \{ q_{ij} \ln q_{ij} \}$$

h)Contagio1 (C_1): cuantifica el grado de agregación de pixeles con igual tipo de cobertura (igual categoría); varía entre 0 y el valor máximo, y se calcula como

$$C_1 = E_{max.} - E$$

i)Contagio 2 (C2): C_2 varía entre 0 y 1.- A medida que la entropía se aproxima al máximo posible, el índice C_2 se aproxima a 0; vale decir, cuanto más intrincado es el paisaje, menor es C_2 , y cuanto mayor agregación de pixeles de la misma categoría (fragmentos grandes), menor es la entropía, y C_2 se aproxima a su valor máximo que es 1.- La relación es:

$$C_2 = 1 - (E/E_{máx.})$$

j)Contagio 3 (C_3): C_3 varía entre 0 que corresponde a un paisaje muy intrincado y el valor máximo que depende de *m,* para un paisaje con manchones grandes, y se calcula como

$$C_3 = H'_{máx.} - H'$$